

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.028



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水平荷载作用下边坡-负载嵌岩单桩体系拟静力 试验研究

刘立平¹, 李孟¹, 曾未名², 李瑞锋¹, 刘磊¹

(1. 重庆大学土木工程学院; 结构抗震防灾重庆市重点实验室, 重庆 400045; 2. 四川省建筑科学研究院有限公司, 成都 610081)

摘要:为研究水平荷载作用下竖向负载岩质边坡单桩承载特性, 鉴于开展动力学试验较为困难和复杂, 采用拟静力试验方法, 以相似材料模拟岩体及桩基, 施加竖向与水平荷载, 开展 3 组试验, 分析不同坡度及桩岩弹性模量比下桩身弹性弯矩、桩周岩石压力及桩顶滞回曲线的变化规律。结果表明: 岩质边坡桩基水平承载力主要与埋深 $3D$ (D 为桩径) 以上范围内的浅层坡体有关; 下坡向岩体的破坏形式与土质边坡类似, 经历了裂缝出现、破坏面发育、浅层坡体破坏 3 个阶段, 但上坡向岩体并未形成完整破坏面; 桩基最终剪切破坏表明, 在中风化岩质边坡条件下, 水平承载力主要由桩身强度控制; 坡度主要影响上坡向承载力, 当坡度由 15° 变化为 30° 时, 上坡向承载力提高了 41.3%, 下坡向承载力仅提高了 0.15%, 而当桩岩弹性模量比由 2.8 变为 0.9 时, 正向承载力提高了 80.7%, 负向承载力也提高了 73.5%。

关键词:边坡嵌岩桩; 水平承载特性; 桩土相互作用; 拟静力试验

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)02-0089-09

Pseudo-static test of slope-single load rock-socketed pile system under horizontal load

LIU Liping¹, LI Meng¹, ZENG Weiming², LI Ruifeng¹, LIU Lei¹

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of Earthquake Resistance and Disaster Prevention for Engineering Structures, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Sichuan Academy of Construction Sciences Co. Ltd, Chengdu 610081, P. R. China)

Abstract: In order to study the bearing characteristics of single loaded rock-socketed pile under horizontal load, pseudo-static model tests considering the vertical and horizontal loadings were adopted in view of the challenge of dynamic test, in which rock and pile are simulated with similar material. The elastic bending moment, rock pressure around the pile and the hysteresis curve of the pile top are analyzed under different slopes and elastic modulus of rock. The results show that the horizontal bearing capacity of pile foundation of rock slope is mainly related to shallow slope within the range of buried depth above $3D$ (D is pile diameter). The failure pattern of

收稿日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(52278481); 重庆市建设科技项目(城科学 2020 第 3-16)

作者简介: 刘立平(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑结构抗震设计理论研究, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn。

Received: 2022-08-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52278481); Construction Science and Technology Foundation of Chongqing (No. 2020-3-16)

Author brief: LIU Liping (1971-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: reinforced concrete structure, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn.

the downslope rock mass is similar with that of the soil slope, which goes through three stages: the emergence of cracks, the development of failure surface and the failure of the shallow slope body, even though the upslope rock mass has not formed a complete failure surface. Finally, the shear failure of pile foundation leads to the failure of horizontal bearing capacity, indicating that when the slope is of rock, the slope mainly affects the positive bearing capacity. When the slope angle ranges from 15° to 30° , the positive bearing capacity increases by 41.3%, while the negative bearing capacity only increases by 0.15%. The slope material strength has an impact on both positive and negative bearing capacity. The pile-rock elastic modulus ratio changes from 2.8 to 0.9, while the positive and negative bearing capacity increase by 80.7% and 73.5%, respectively.

Keywords: rock-socketed pile of slope; horizontal bearing characteristics; pile-soil interaction; pseudo static test

随着人口的增长和城镇化的发展,城市用地愈加紧张,山地作为常见地貌,也被进一步利用,以满足日益紧张的建设用地需求,于是出现大量邻近边坡或位于边坡面上的建筑,即邻坡建筑。这些邻坡建筑通常采用桩基,以使上部结构的荷载传到稳定的基岩,而由于坡体的不对称性,位于斜坡上的桩基与坡体的相互作用效应十分明显。

许多学者对边坡桩基开展了研究。在理论计算方面,赵文等^[1]基于摩尔准则和Hoek-Brow准则对自然边坡进行了稳定性分析,给出了斜坡桥梁桩基安全水平距离、陡坡桥梁桩基安全距离的判断方法和计算方法。杨明辉^[2]认为,一定深度内,斜坡地基土体仅能提供有限抗力,在外力荷载作用下,边坡不稳定,应对桥梁桩前土抗力进行折减或忽略。胡启军等^[3]推导了桩与红层泥岩接触面的本构关系。戴自航等^[4-5]采用数值模拟方法分析了抗滑桩在不同荷载下的受力情况,结合实际工程岩土属性,测算陡坡荷载分布,对桩基位移和应力改变量进行了研究。针对桩基水平承载力计算方法,Chen等^[6]提出了一种基于楔平衡分析的针对无黏性土的刚性桩水平承载力计算方法。假定桩前土以楔形破坏,考虑土的正面和侧剪阻力,采用双曲线 p - y 曲线描述刚性桩的水平抗力,并通过试验进行验证。Chandaluri等^[7]和Di等^[8]针对黏性土边坡,探究了在不同排水、桩顶不同约束条件下的桩水平承载力计算公式。在试验研究方面,Rathod等^[9]以坡角与埋深为自变量开展模型试验,得出了当坡度小于 11.3° 时坡度对桩承载力的影响可以忽略不计的结论。李彰明等^[10]结合工程实际,针对桩基位置这一影响因素,开展了水平承载试验,表明试桩离边坡脚越近水平承载力越大。尹平保等^[11]设计完成了不同坡度及水平荷载作用角度下斜坡桥梁基桩试验,得到了桩顶荷载位移曲线及桩身弯矩分布,表明水平荷载相同时,随着坡度的增加,桩顶水平位移及桩身最大弯矩均呈非线性增大,随水平荷载作用角度增加而呈线性减小;基桩水平极限承载力却随坡度

增加而减小,随水平荷载作用角度增加而增大。赵明华等^[12]通过模型试验,得到了不同坡度、荷载幅值及循环次数下斜坡单桩桩顶水平位移及弯矩分布情况,得出了桩顶水平位移的拟合计算公式。黄福云等^[13]通过低周往复试验,对单桩-土体系的抗震性能和相互作用机制进行了讨论。Yu等^[14]采用S-RM材料作为岩土混合体的相似材料,开展了针对岩土混合边坡的相关模型试验。采用由初始刚度和极限阻力控制的 p - y 曲线作为桩的水平承载力模型,并通过数值模拟进行验证。

研究表明,相较于平地桩基,边坡桩基的受力情况更加复杂,常见的土质边坡破坏形式为桩前坡体出现锐角楔形破坏面,桩后坡体出现钝角楔形破坏面^[15],与平地边坡相比,斜坡桩基在上、下坡方向承载力存在较大差异。但目前对边坡桩基的研究大多针对竖向荷载作用或水平荷载作用下的边坡桩,边坡形式也多为土质边坡,缺乏对边坡桩基抗震性能及岩质边坡桩基的研究。考虑到开展动力学试验较为困难,笔者采用拟静力试验的方式开展3组模型试验,研究边坡倾角、桩岩弹性模量比对边坡嵌岩单桩桩身弯矩、桩周岩石压力、水平承载力等性能指标的影响,给出岩质边坡桩基的破坏形式及桩土相互作用范围。

1 试验设计

1.1 试验模型

以岩质边坡坡度及桩岩弹性模量比($E_{\text{桩}}/E_{\text{基岩}}$)为自变量开展试验,考虑 15° 、 30° 两种坡度,中风化泥岩和砂岩两种基岩条件,共进行3组试验,模型桩均采用同种材料。

试验的桩基原型根据文献[16]中山地建筑结构的中柱荷载进行设计,轴力、剪力和弯矩分别为 $N=2\,661.5\text{ kN}$ 、 $V=2.1\text{ kN}$ 、 $M=7.3\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。因弯矩和剪力较小,忽略其影响,只按轴力设计桩基,场地条件以某工程地质勘察报告为依据,选取其中泥

岩和砂岩作为模拟基岩的原型。考虑目前常用相似材料的力学参数范围,试验几何相似比为 1:10,密度相似比为 1:1,应力相似比为 1:10,满足相似准则,设计的 3 组模型桩参数见表 1。

表 1 模型试验分组
Table 1 Model test grouping

编号	桩 <i>D</i> /mm	桩 <i>H</i> /mm	边坡坡度 $\theta/(^{\circ})$	埋深 <i>h</i> /mm	模拟基岩	桩岩弹性模量比	竖向力/kN
Z-1	100	1 200	30	900	中等风化泥岩	2.8	2.6
Z-2	100	1 200	30	900	中等风化砂岩	0.9	2.6
Z-3	100	1 200	15	900	中等风化泥岩	2.8	2.6

试验模型桩及岩质边坡均采用相似材料制作,具体参数通过材性试验获得。模型桩采用石英砂:水:石膏=5:1:1 的配比方案;泥岩采用石英砂:重晶石:水泥:石膏=72:8:5:5(用水量为试件质量的 1/10,水中硼砂的浓度为 1%)的配比方案;砂岩采用石英砂:重晶石:水泥:石膏=42:18:6:6(用水量为试件质量的 1/10,水中硼砂的浓度为 1%)的配比方案^[17-18]。原型与模型各物理量参数见表 2 和表 3。

表 2 原型桩与模型桩参数对比
Table 2 Parameter comparison between prototype pile and model pile

桩	桩径/mm	桩长/mm	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	纵筋	配筋面积/mm ²	箍筋
原型桩	1 000	12 000	20.1	30 000	16Φ25	7 850	Φ8@100/200
模型桩	100	1 200	2.56	517.33	12Φ2.8	78.5	Φ1.2@20/40

表 3 原型基岩与模型基岩参数对比
Table 3 Comparison of bedrock parameters between prototype and model

基岩	岩石名称	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
原型	中等风化泥岩	8.03	2 400
模型	中等风化泥岩	1.47	227.70
原型	中等风化砂岩	29.5	5 679
模型	中等风化砂岩	3.14	597.4

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,模型桩置于土工箱中,通过向配重箱中放置配重块施加竖向荷载,水平荷载由作动器施加。为便于加载,将桩基伸出岩质边坡 300 mm,同时,为了保证伸出自由段的强度和刚度,防止桩头弯曲破坏,确保位移传递到埋入段中,采用一端角度与坡度相同的钢管对桩基伸出段进行加强。

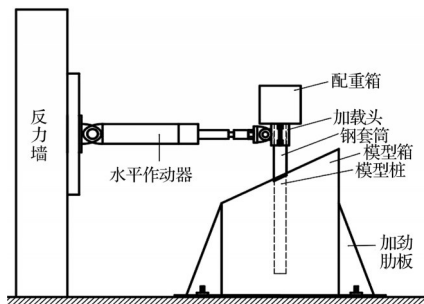


图 1 试验装置
Fig. 1 Testing setup

模型箱为试验提供边界约束条件,楼梦麟等^[19]研究了土介质范围对土-结构体系模型试验的影响,发现土介质范围和结构尺寸之比大于 5 时边界条件

的影响可忽略不计。因此,试验所采用模型箱均按 $B/D \geq 10$ 的条件进行设计,长宽均为 100 cm。

1.3 加载方案

加载制度如图 2 所示。为模拟上部结构所传递的荷载及地震作用,在模型桩桩顶施加竖向荷载及水平荷载。竖向荷载通过配重块分级施加至桩顶配置箱内,每级添加配重 40 kg,共添加配重 240 kg,同时考虑加载头及配重箱重量共计 20 kg,共施加竖向荷载 2.6 kN,在之后的循环水平加载中维持不变。水平荷载通过水平作动器施加,采用位移控制,加载的各级位移值为:±1、±1.6、±2.4、±4、±6、±8、±12、±16、±20、±24、±30、±40 mm,达到 40 mm 后,按 10 mm 递增,直至构件破坏。为提高滞回曲线的准确性,对同一峰值位移循环加载两次。

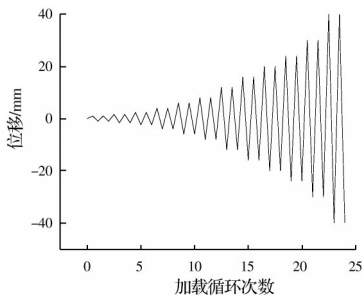


图 2 水平荷载加载方案
Fig. 2 Loading system

1.4 测试方案

测量桩顶位移、桩土交界面位移、桩身应变及桩周岩石压力,传感器的布置如图 3 所示。其中位移计 1 测量桩头加载处水平位移,位移计 2 测量桩-

岩交界面处水平位移。在模型桩两侧按照间距 10 cm 等间距布置应变片,共 17 个,均采用 1/4 桥法连接。桩周岩石压力采用土压力计进行测量,土压力计尺寸为 $22\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 22\text{ mm}$,量程为 3 MPa,在模型桩埋入部分上半段每隔 10 cm 布置一个土压力盒,下半段隔 20 cm 布置一个土压力盒,在桩底埋设一个土压力盒,测量桩端阻力,共布置 13 个土压力计。

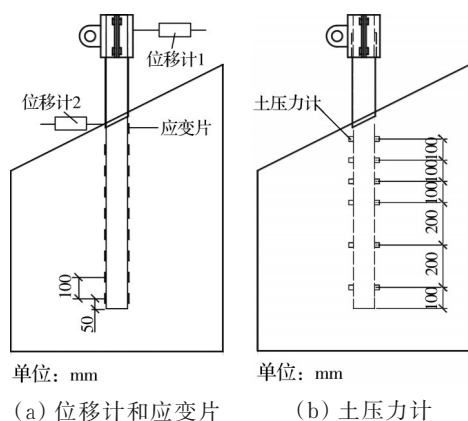


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Sensor layout

2 试验结果分析

为方便描述,约定水平位移方向上坡时为正,反之为负,下方桩周岩体为桩前岩体,上方桩周岩体为桩后岩体。

2.1 破坏形态

模型桩 Z-2 和 Z-3 破坏情况与模型桩 Z-1 大体相同,以模型桩 Z-1 为例,对试验现象进行描述。

在位移较小时,水平荷载由桩-岩共同承担,此时桩-岩均处于弹性状态,围岩对桩的嵌固效果较好。随着位移增大,桩-岩间逐渐产生间隙,桩周浅层岩体也发生破坏,但由于边坡的影响,桩身两侧岩体破坏形式存在较大差异。桩前岩体的破坏过程主要分为出现纺锤形裂缝、裂缝发育、浅层坡体脱出 3 个阶段;而在整个试验过程中,随荷载的不断增大,桩后岩体隆起程度不断加剧,但直至最终桩身发生剪切破坏,桩-岩体系失去承载能力,桩后岩体也未产生明显破坏,仍能为桩身提供一定约束。最终,由于钢管对上部桩身的加强作用,在施加正向荷载时,钢管端部处桩身产生剪切破坏,导致整个桩-岩体系丧失承载能力。破坏形式如图 4、图 5 所示。

对比 3 个模型,模型桩 Z-2 破坏最严重,在模型桩和加强钢管交界面桩身已经破碎,钢筋也被全部

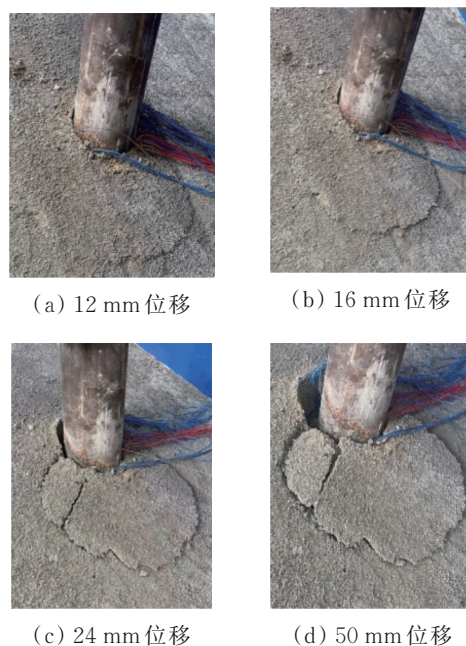


图 4 桩-岩间隙发展及桩前岩体开裂

Fig. 4 Pile-rock gap development and rock cracking in front of pile

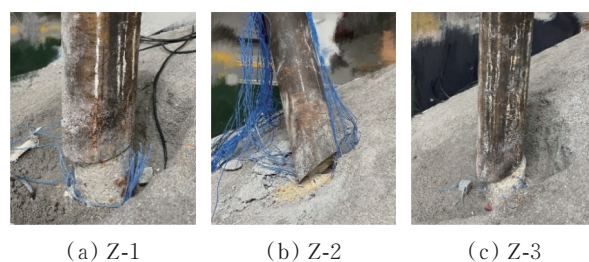


图 5 模型桩最终破坏形态

Fig. 5 Final failure pattern of model pile

拉断;其次是模型桩 Z-1,桩身相对完好,可以观察到模型桩和加强钢管交界面也发生了剪切破坏;模型桩 Z-3 和 Z-1 类似,也是在桩和钢管交界面发生了剪切破坏,只是相对模型桩 Z-1 而言没有那么明显。说明基岩刚度和边坡倾角越大,桩后岩体对于桩身的约束效果也就越好,模型桩破坏程度也越发严重。

由此可见,在边坡体为中风化岩石的条件下,桩-岩体系在承载水平荷载时的破坏形式与边坡为土质边坡时存在一定相似性,土质边坡的破坏形式如图 6 所示,桩前坡体出现锐角楔形破坏面,桩后坡体出现钝角楔形破坏面。需要注意的是,试验中仅桩前坡体形成了完整破坏面,浅层坡体脱出,而桩后岩体虽产生了隆起,但未能完全形成完整破坏面,仍具有一定的约束作用。

2.2 桩身弹性弯矩

桩身弹性弯矩可由试验实测的桩身各截面拉压应变求得,计算式为

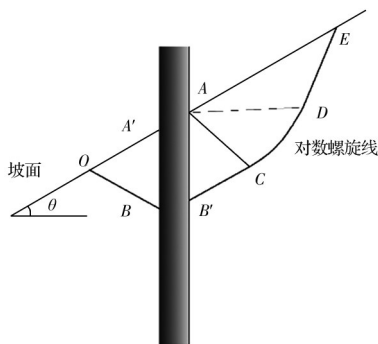


图 6 泥质边坡桩周坡体破坏示意图

Fig. 6 Mud slope failure mode around piles

$$M=\frac{EI(\epsilon_l-\epsilon_y)}{D}$$

式中: M 为桩身弹性弯矩; D 为桩径; EI 为桩身抗弯刚度; ϵ_l 、 ϵ_y 分别为桩身各测点处拉、压应变。

由于试验所用桩身模拟材料抗拉强度较低,在位移较大时桩身应变为非弹性状态,且模型桩 Z-3 试验时,部分应变片意外失效,故仅给出模型桩 Z-1 及 Z-2 位移较小时的桩身弯矩分布情况,如图 7 所示,计算得到的桩身弯矩见表 4。

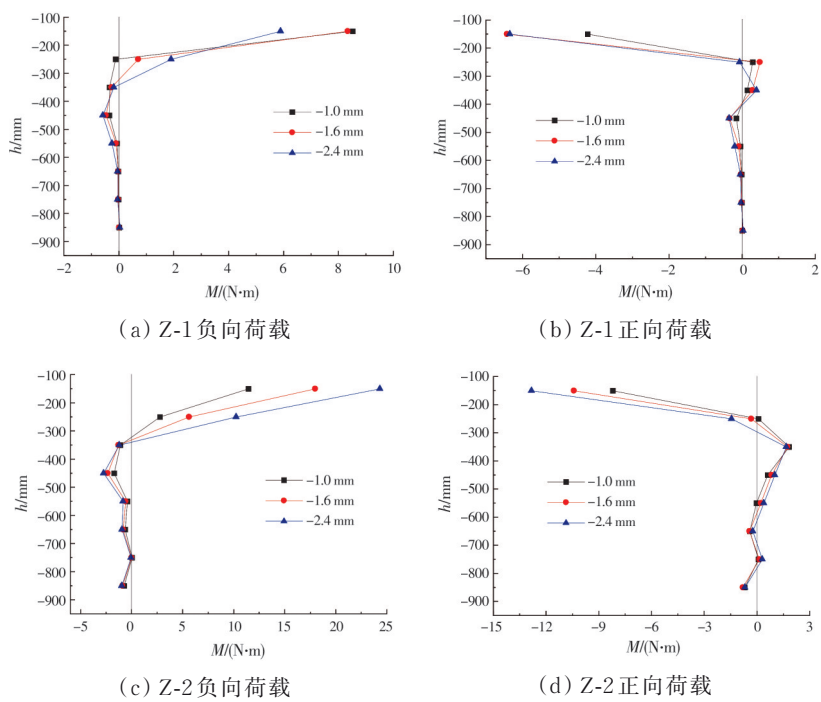


图 7 模型桩桩身弯矩分布

Fig.7 Bending moment distribution of model pile

表 4 桩身弹性弯矩汇总

模型桩编号		桩身弯矩/(N·m)							
		—150 mm	—250 mm	—350 mm	—450 mm	—550 mm	—650 mm	—750 mm	—850 mm
Z-1	—1	8.51	—0.12	—0.34	—0.34	—0.07	—0.03	—0.02	0.01
	—1.6	8.34	0.70	—0.27	—0.47	—0.10	—0.02	—0.02	0.02
	—2.4	5.89	1.90	—0.19	—0.58	—0.25	—0.05	—0.04	0.03
	1	—4.22	0.29	0.14	—0.16	—0.05	—0.01	—0.01	0.00
	1.6	—6.42	0.48	0.28	—0.34	—0.09	—0.03	—0.01	0.01
	2.4	—6.35	—0.07	0.39	—0.36	—0.21	—0.05	—0.03	0.02
Z-2	—1	11.44	2.78	—1.12	—1.73	—0.42	—0.64	0.04	—0.74
	—1.6	17.98	5.63	—1.29	—2.34	—0.59	—0.84	0.00	—0.90
	—2.4	24.32	10.23	—1.21	—2.73	—0.83	—0.93	—0.05	—0.96
	1	—8.20	0.07	1.82	0.60	—0.04	—0.41	0.08	—0.71
	1.6	—10.42	—0.33	1.73	0.81	0.21	—0.43	0.11	—0.81
	2.4	—12.84	—1.45	1.66	1.00	0.38	—0.24	0.30	—0.69

对比模型桩 Z-1 及 Z-2,在相同水平位移荷载作用下,模型桩 Z-2 桩身及测点弯矩均大于模型桩 Z-1。以位移达到 -2.4 mm 为例,模型桩 Z-2 比模型桩 Z-1 大 313%,其增加比例与岩体弹性模量的增加比例较为相近。说明在弹性状态下,坡体刚度增加,相同位移下需要施加的外荷载也成比例相应增加。同时,模型桩 Z-1 的弯矩反弯点相较于模型桩

Z-2 更浅,这是由于岩体刚度增加后能够提供的水平抗力增加,故相同位移时外荷载更大,对桩身的影响范围也更深。

2.3 桩周岩石压力

由于数据量较大,表 5 仅给出部分桩周岩石压力数据,不同位移作用下桩周岩石压力如图 8 所示。

表 5 桩周岩石压力
Table 5 Rock pressure around pile

模型桩 编号	测点位 置/mm	压力/kPa									
		-1 mm	-8 mm	-24 mm	-40 mm	-50 mm	1 mm	8 mm	24 mm	40 mm	50 mm
Z-1	-100	-0.65	-2.30	-10.13	-66.64	-119.95	2.16	7.22	15.26	21.16	23.55
	-200	1.43	0.77	-0.99	-5.95	-9.75	0.28	-0.20	0.28	1.49	1.45
	-400	0.30	-0.26	-5.55	-8.23	-8.94	-0.32	-0.26	2.60	3.89	6.55
	-600	-0.63	-1.53	-3.63	-10.84	-12.41	-0.48	0.02	2.87	4.00	4.52
Z-2	-100	-8.53	-10.41	-121.00	-637.47	-656.97	5.27	5.27	20.19	36.55	35.61
	-200	-0.50	-2.26	-22.45	-21.44	-18.50	4.51	6.14	8.28	8.72	8.90
	-400	-10.16	-12.41	-2.57	-8.84	-13.48	1.32	0.50	2.88	0.63	0.19
	-600	-6.40	-9.53	-6.40	-5.45	-5.71	1.13	6.27	9.41	13.04	13.61
Z-3	-100	-0.93	-14.37	-43.41	-106.15	-119.41	-2.18	7.10	32.51	34.69	33.50
	-200	0.16	-1.27	-0.14	-0.59	-1.82	-1.19	5.95	8.52	5.35	4.56
	-400	0.12	-0.36	-0.87	-0.83	-1.13	-0.20	0.99	3.17	3.57	5.35
	-600	-0.20	-0.32	-0.10	-0.44	-0.65	-0.99	-2.18	-0.20	-1.98	-1.39

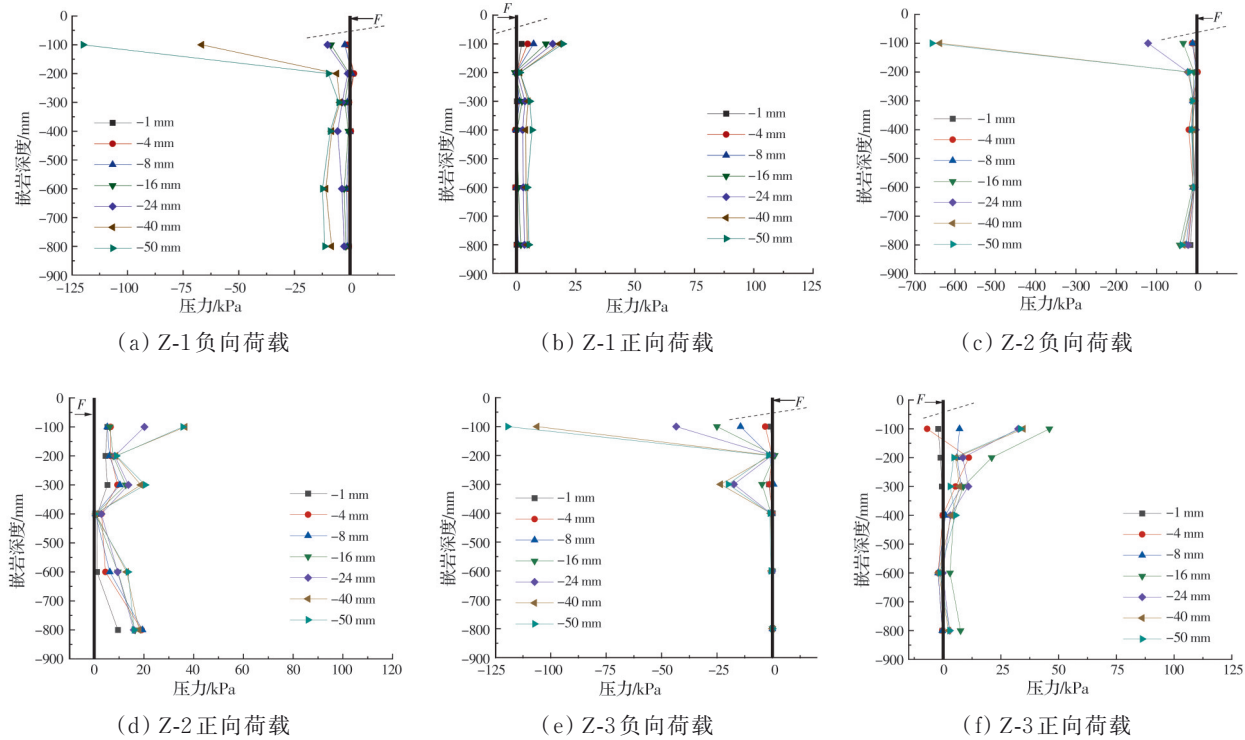


图 8 桩周岩石压力
Fig. 8 Pile-rock pressure under displacement

对比模型桩 Z-1 与 Z-2,在位移相同时,模型桩 Z-2 周岩体压力更大,在位移达到 -50 mm 时,模型桩 Z-2 比模型桩 Z-1 大 447.7%;位移达到 $+50\text{ mm}$

时,模型桩 Z-2 比模型桩 Z-1 大 187.1%,说明岩体刚度对桩周岩石压力的影响十分显著。正负向增加幅度不同是因为虽然岩体刚度增加了,但桩本身

的承载力没变,而相同位移下,上坡向荷载又远大于下坡向,故施加上坡向荷载时桩要更早屈服,从而测得的岩石压力增幅较小。

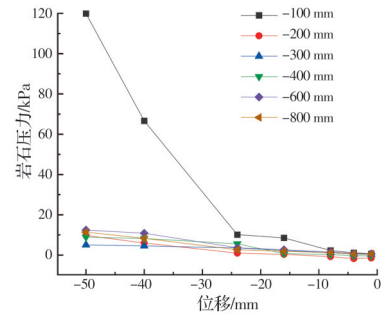
对比模型桩 Z-1 与 Z-3,在位移达到 -50 mm 时,模型桩 Z-1、Z-3 桩周岩石压力分别为 119.95、119.41 kPa;位移达到 $+50$ mm 时,模型桩 Z-1、Z-3 桩周岩石压力分别为 19.54、33.52 kPa,模型桩 Z-3 比模型桩 Z-1 大 71.4%。说明边坡倾角的改变主要影响上坡向的岩石压力,而由于浅层岩体会发生破坏,使承担荷载的岩体向更深处转移,导致下坡向土压力计测得的岩石压力相差不大,但由于上坡向未发生破坏,故岩石压力存在明显增加。

图 9 为模型桩 Z-1 各个测点所测得的岩石压力随位移的变化图,可以明显看到,埋深最浅的测点 (-100 mm) 处岩石压力变化最明显。对比正负向岩石压力变化可以发现,在进行下坡向加载时,第 1 个测点测得的岩石压力产生了一个明显的拐点,而上坡向加载时,第 1 个测点并未产生明显拐点,说明在整个试验过程中下坡向岩体的水平抗力由弹性阶段逐渐向塑性发展,浅层岩体已经进入了塑性阶段,但上坡向坡体尚未进入塑性阶段,仍能对桩身提供约束。这与试验中坡体仅在下坡向发生了破坏,上坡向坡体尚未破坏的现象相符,印证了在坡体强度较高时桩身将于坡体破坏前先破坏。

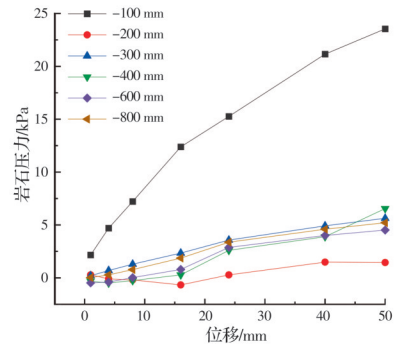
2.4 滞回曲线

试验所得滞回曲线如图 10 所示。由图 10 可知,3 个模型桩的滞回曲线均存在明显的捏缩效应,形状不饱满,产生了很大的滑移,抗震耗能能力较差。这是由于随着荷载不断增大,桩体与岩体间隙不断发展,产生脱空段,在循环开始时桩-岩尚未接触,荷载继续增加后,桩-岩重新接触,再次形成桩-岩共同受力体系,刚度增加,因此滞回环呈“Z”型。

滞回曲线形状不对称是由于坡度引起的桩两侧坡体约束作用不同。在荷载不断增大的过程中,桩前岩体产生完整破坏面,浅层岩体脱出,丧失对



(a) Z-1 负向荷载



(b) Z-1 正向荷载

图 9 Z-1 岩石压力变化

Fig.9 Rock pressure variation

桩身的约束作用,而桩后岩体并未形成完整破坏面,仍能对桩身起到约束作用,最终,随着桩身的剪切破坏,桩-岩体系丧失承载能力,导致上坡向桩-岩体系的刚度及最大承载力均比下坡向大。

正负向承载力存在差异的原因也说明,在设置的具有一定强度中风化岩石坡体条件下,桩身水平承载力的决定因素也与土质边坡存在差异。在土质边坡条件下,由于桩身强度够高,故无论是正向还是负向荷载作用下,最终均由于坡体形成如图 6 所示的完整破坏面,使得桩顶水平位移过大,从而导致桩水平承载力失效。而若在坡体材料具有一定强度时,则很可能出现如正向荷载作用下的情况,桩身已经达到水平承载力极限,发生了剪切破坏,而坡体仍未形成完整破坏面。因此,在坡体强度

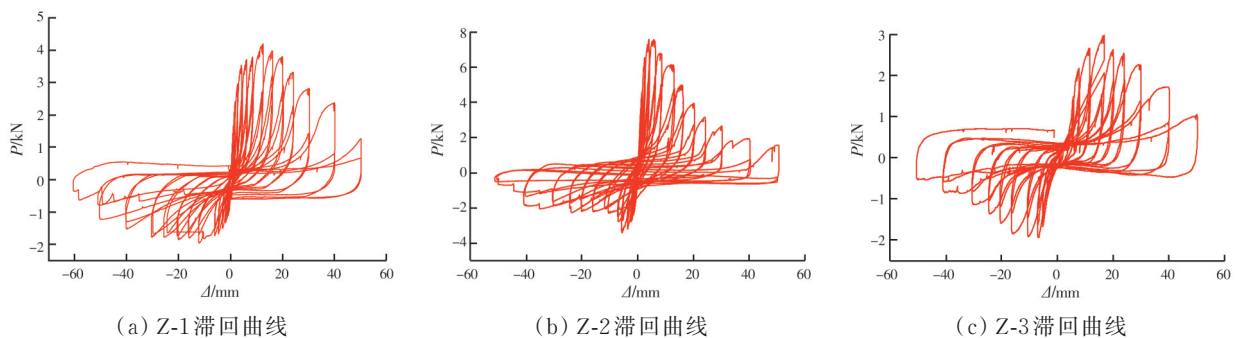


图 10 模型桩滞回曲线

Fig. 10 The hysteresis curve obtained from the test

较高时,桩的水平承载力主要与桩本身的强度有关。

在线弹性阶段,模型桩 Z-2 刚度略大于模型桩 Z-1,而模型桩 Z-3 刚度则明显小于另外两个模型桩;在屈服阶段,3 个模型桩的承载力均随着位移的增加而增大,刚度则逐渐降低,对比模型桩 Z-1 与 Z-2,模型桩 Z-2 的正向最大承载力比模型桩 Z-1 大 80.7%,负向最大承载力比模型桩 Z-1 大 73.5%,说明坡体刚度的增加会明显提高桩基的水平承载力。桩-岩相对刚度的减小,也就是相同外荷载作用下,坡体刚度增大,岩体承担的外荷载就越大,从而使得在桩基发生破坏时,桩-岩体系整体承担的荷载增加;对比模型桩 Z-1 与 Z-3,模型桩 Z-1 的正向最大承载力比模型桩 Z-3 大 41.3%,负向最大承载力比模型桩 Z-3 大 0.15%,说明坡度越大,上坡向坡体的“楔形”部分作用就更明显,也能增加岩体提供的水平抗力,从而增加桩-岩体系上坡向的承载能力。但下坡向变化不大,可能是由于下坡向浅层岩体破坏使得桩-岩体系的最大承载力仅为浅层岩体破坏时的荷载。

2.5 桩基正负向测值差异分析

桩身弹性弯矩、桩周岩石压力、滞回曲线在正反两个方向均存在明显差异。从桩身弹性弯矩图(图 7)及桩周岩石压力图(图 8)中可以看出,在施加负向荷载时,沿桩身往下第 1 个测点处测得的数值总是大于施加正向荷载时,而在滞回曲线中,位移相同时,上坡向的荷载却总是大于下坡向,二者似乎存在矛盾。这是由于施加的水平荷载主要由浅层坡体承担,沿桩身往下衰减极快,而正负两方向同时施加荷载时,相对于坡面来说,上坡向第 1 个测点的埋深比下坡向测点更大,如图 11 所示,这就使得传递到上坡向第 1 个测点的荷载要比下坡向更小。

通过分析不同埋深处岩石压力随位移的变化规律发现,下坡向坡体已进入塑性阶段,而上坡向

仍处于弹性阶段,两个方向存在一定差异。这与岩土体水平抗力分布规律以及边坡坡度有关,大量的桩-土相互作用 p - y 曲线研究都指出,埋深增加会使岩土体的极限水平抗力增加,即埋深越深,岩土体能够提供的水平抗力就越大。由于边坡的影响,相较于平地状态,上坡向坡体能够将力传递到坡上的“楔形体”部分,其极限水平抗力增加,相当于变相增加了埋深。而下坡向则相反,相较于平地状态,缺少了“楔形体”部分的作用,其极限水平抗力减小,从而使得两个方向上坡体的破坏形式以及第 1 个测点处岩石压力变化规律都存在差异。

3 结论

1) 水平荷载主要由浅层坡体承担,在埋深 $3D$ (D 为桩径) 以上范围内,模型桩身弯矩及桩周岩石压力变化最为明显,向下衰减极快,在埋深 $5D$ 以下范围时,其变化幅度很小。

2) 桩在上坡和下坡向的水平承载特性存在较大差异,主要原因是桩两侧岩体破坏形式不同,桩前岩体经历了出现纺锤形裂缝、裂缝发育、浅层坡体脱出 3 个阶段,而桩后坡体仅表现为隆起程度不断增加,直至最后桩身发生剪切破坏时,也未形成完整破坏面。

3) 土质边坡上桩的水平承载能力失效主要由桩顶位移过大造成,而岩质边坡强度更大,在坡体破坏前,桩已经发生破坏,因此,对于岩质边坡,桩的水平承载力主要由桩身强度控制。

4) 坡度是桩基上坡、下坡方向水平承载力存在差异的原因,但在两个方向上影响不同,由 15° 变化为 30° 时,上坡向水平承载力提高 41.3%,而下坡向仅提高 0.15%。表明坡度主要影响上坡向承载力,而坡体弹性模量对两个方向桩水平承载力的影响区别不大,桩-岩弹性模量比由 2.8 变为 0.9 时,上坡向承载力提高了 80.7%,下坡向也提高了 73.5%。

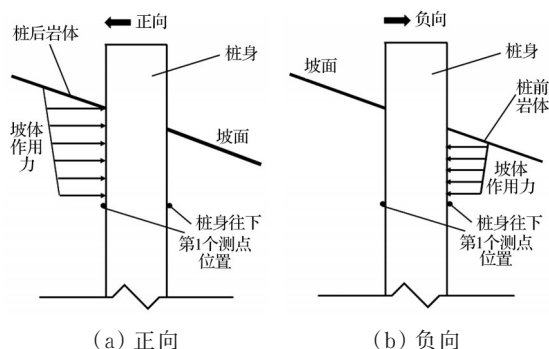


图 11 坡体正反向受力区别

Fig. 11 Comparison of positive and negative forces of slope body

参考文献

- [1] 赵文, 谢强, 龙德育. 高陡岸坡桥基合理位置确定方法[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(6): 94-98.
ZHAO W, XIE Q, LONG D Y. Method for reasonably positioning bridge foundation on high-steep slope [J]. China Railway Science, 2004, 25(6): 94-98. (in Chinese)
- [2] 杨明辉. 岩质陡坡桥梁桩基承载机理及其分析方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
YANG M H. Analysis method and load mechanics for rock slope bridge piles [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [3] 胡启军, 蒋晶, 徐亚辉, 等. 红层泥岩桩岩接触面本构

- 模型试验及数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 122-128.
- HU Q J, JIANG J, XU Y H, et al. Interface constitutive model test and numerical simulation of red mudstone pile-rock [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 122-128. (in Chinese)
- [4] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517-521.
- DAI Z H. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517-521. (in Chinese)
- [5] 戴自航, 张晓咏, 邹盛堂, 等. 现场模拟水平分布式滑坡推力的抗滑桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1513-1518.
- DAI Z H, ZHANG X Y, ZOU S T, et al. Field modeling of laterally distributed landslide thrusts over anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1513-1518. (in Chinese)
- [6] CHEN L J, JIANG C, PANG L, et al. Lateral soil resistance of rigid pile in cohesionless soil on slope [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104163.
- [7] CHANDALURI V K, SAWANT V A. Influence of sloping ground on lateral load capacity of single piles in clayey soil [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 14(4): 353-360.
- [8] DI LAORA R, MAIORANO R M S, AVERSA S. Ultimate lateral load of slope-stabilising piles [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(3): 237-244.
- [9] RATHOD D, MUTHUKUMARAN K, THALLAK S G. Experimental investigation on behavior of a laterally loaded single pile located on sloping ground [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(5): 04019021.
- [10] 李彰明, 全国权, 刘丹, 等. 土质边坡建筑桩基水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 930-935.
- LI Z M, QUAN G Q, LIU D, et al. In-situ testing study on pile foundation in soil slope under horizontal loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 930-935. (in Chinese)
- [11] 尹平保, 贺伟, 张建仁, 等. 斜坡基桩的斜坡空间效应及其水平承载特性研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 94-101.
- YIN P B, HE W, ZHANG J R, et al. Study on spatial effect of slope and horizontal bearing behavior of piles in sloping ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 94-101. (in Chinese)
- [12] 赵明华, 黄万江, 杨超炜, 等. 水平循环荷载下斜坡段基桩动力响应特性模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2268-2277.
- ZHAO M H, HUANG W J, YANG C W, et al. Model test on dynamic response characteristics of pile in sloping ground subjected to lateral cyclic loading [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2268-2277. (in Chinese)
- [13] 黄福云, 陈汉伦, 董锐, 等. 水平低周往复位移下单桩-土相互作用试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1625-1634.
- HUANG F Y, CHEN H L, DONG R, et al. Experimental study of single pile-soil interaction under horizontal low-cycle reciprocating displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1625-1634. (in Chinese)
- [14] YU Y, SUN H Y, JUANG C H. A new model for response of laterally loaded piles in soil-rock mixtures [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 237-246.
- [15] 赵明华, 彭文哲, 杨超炜, 等. 斜坡地基刚性桩水平承载力上限分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 727-735.
- ZHAO M H, PENG W Z, YANG C W, et al. Upper bound analysis of lateral bearing capacity of rigid piles in sloping ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 727-735. (in Chinese)
- [16] 刘立平, 李瑞锋, 崔铭, 等. 钢筋混凝土吊脚楼平面框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 165-175.
- LIU L P, LI R F, CUI M, et al. Experimental study on seismic behavior of plane frame structures of RC stilted buildings [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 165-175. (in Chinese)
- [17] 杨仁树, 张宇菲, 杨立云, 等. 石膏类相似材料的配比试验研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(10): 125-130.
- YANG R S, ZHANG Y F, YANG L Y, et al. Study on the mixing proportion test of similar material gypsum [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(10): 125-130. (in Chinese)
- [18] 史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1357-1362.
- SHI X M, LIU B G, XIAO J. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1357-1362. (in Chinese)
- [19] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤, 等. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 30-36.
- LOU M L, WANG W J, ZHU T, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil - structure system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 30-36. (in Chinese)